第 38 卷第 8 期 2018 年 4 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.8 Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201708071415
杨立荣,张治礼,云勇,严武平,陈宣,张浪,郑道君,陈加利.濒危植物海南龙血树的种群结构与动态.生态学报,2018,38(8):2802-2815.
Yang L R, Zhang Z L, Yun Y, Yan W P, Chen X, Zhang L, Zheng D J, Chen J L.The population structure and dynamics of *Dracaena cambodiana*, an endangered tree on Hainan Island.Acta Ecologica Sinica,2018,38(8):2802-2815.

濒危植物海南龙血树的种群结构与动态

杨立荣[1,4],张治礼[1,4],云 勇[1,4],严武平[1,3,4],陈 宣[1,4],张 浪[1,4],郑道君[1,2,4,*],陈加利[1,4]

1 海南省农业科学院热带园艺研究所,海口 571100
2 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所,海口 571100
3 海南大学,海口 570228
4 海南省热带特种经济植物种质资源创新利用重点实验室,海口 571100

摘要:了解种群的生存现状与动态趋势对濒危植物的保护至关重要。为了更好地保护濒危海南龙血树种群,对海南岛不同生境的 11 个海南龙血树(*Dracaena cambodiana*)种群进行了调查;并利用个体基径数据建立各种群的年龄结构和静态生命表,得到种群年龄结构动态指数,绘制种群存活曲线和生存函数曲线,从而获得海南龙血树的种群结构与动态。结果表明:海南龙血树种群年龄结构与种群所处的生境关系密切,海边的 NS 和 YL 种群结构为衰退型,LN 和 CH 居群为稳定型,而非海边种群为增长型,没有老龄个体;11 个种群中,EXL 种群显示出最高的增长趋势和最好的种群稳定性,NS 和 YL 种群稳定性最差,种群抗干扰能力极低;11 个种群的存活曲线均属于 Deevey-Ⅰ型,但生存函数分析显示海南龙血树种群生活史早期和晚期脆弱,中期稳定,这表明海南龙血树种群所处的生境更适合成年个体生存,现有的生境对幼龄个体的环境筛作用较强。海南龙血树属于退偿物种,针对其种群的生存现状,应采取多种方法相结合的方式进行保护与复壮。

关键词:海南龙血树;年龄结构;种群动态指数;存活曲线;生存函数

The population structure and dynamics of *Dracaena cambodiana*, an endangered tree on Hainan Island

YANG Lirong[1,4], ZHANG Zhili[1,4], YUN Yong[1,4], YAN Wuping[1,3,4], CHEN Xuan[1,4], ZHANG Lang[1,4], ZHENG Daojun[1,2,4,*], CHEN Jiali[1,4]

1 *Institute of Tropical Horticulture Research in Hainan Academy of Agricultural Sciences*, *Haikou* 571100, *China*
2 *Agricultural Environment And Soil Research Institute in Hainan Academy of Agricultural Sciences*, *Haikou* 571100, *China*
3 *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*
4 *The Key Laboratory of Tropic Special Economic Plant Innovation and Utilization*, *Hainan Province*, *Haikou* 571100, *China*

Abstract: For the protection of an endangered plant, it is very important to understand its population survival status and population dynamics. In order to better protect the rare and endangered *Dracaena cambodiana*, 11 populations of *D. cambodiana* in different habitats on Hainan Island were investigated, and the basal diameter of individuals was recorded to establish age structure and static life table, and then the population age structure dynamic index and the survival curve and survival function curve, so as to determine the population structure and survival status of *D. cambodiana*. The results showed that the population age structure of *D. cambodiana* is closely related to its habitat. Populations in habitats near sea, NS and YL, were declining, whereas those of CH and LN were stable, and the other 7 populations farther from the sea were

基金项目:国家自然科学基金项目(31360071); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2016179)
收稿日期:2017-08-07; **网络出版日期**:2018-01-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: daojunzh@ 163.com

increasing. Among these 11 populations of *D. cambodiana*, the EXL population showed the highest growth trend and the best stability. JFM, JF, CH, and LN populations also showed a growth trend and good stability, whereas NS and YL populations showed the worst stability and anti-interference ability. The survival curve of the 11 *D. cambodiana* populations were of a Deevey-I (convex curve) type, and the survival rate of young individuals was higher than that of middle-aged and aged individuals, indicating that the survival ability of young individuals is better than that of middle-aged and aged individuals. However, the results of survival function analysis showed that the early and late life history of *D. cambodiana* were fragile, whereas that of middle aged was stable, suggesting that the habitat of *D. cambodiana* was more suitable for the survival of middle-aged individuals, and that the young individuals were under strong effects of environmental filtering. *D. cambodiana* is a depensation species, and therefore multiple protection methods should be used to protect and rejuvenate the current populations.

Key Words: *Dracaena cambodiana*; age structure; population dynamic index; survival curve; survival function

种群通常指某一特定时间和区域内同一物种构成的群体,它们共享同一基因库或存在潜在随机交配能力[1]。种群结构是种群的最基本特征,一直以来都是种群生态学研究的核心内容之一,通常通过分析种群的年龄结构、生命表和存活曲线等方法来获得[2-3]。种群结构既能反映现在的种群状态,即现在种群内不同大小个体数量的分布和配置状况,也能反映植物与环境之间的适合度,分析过去种群结构与受干扰情况,预测未来的种群动态和演变趋势[4-6]。因此,研究种群的结构及其动态,有助于人们更好地认识种群的生态特性、稳定性及发展动态等,对濒危种群的更新复壮及其所在群落和生态系统的恢复具有重要意义。

海南龙血树(*Dracaena cambodiana*)(小花龙血树、柬埔寨龙血树),属百合科龙血树属的单子叶植物[7-8],国家二级重点保护植物和稀有濒危保护植物[9-10]。海南龙血树是一种生长缓慢,耐干旱的喜阳植物,目前分布于海南岛西南部的内陆山区及南部沿海地区,生长于裸露花岗岩和石灰岩的石缝残积土中或紧贴石壁生长于砂壤土中,属于典型的岩石伴生植物[11-12]。由于海南龙血树具有较高的药用价值和观赏价值[13-15],野生资源受到掠夺性采挖,野生资源已十分匮乏,种群处于濒危状态。目前关于海南龙血树的研究主要集中在组织快繁、栽培技术、以血竭为基础的基础性研究和开发利用以及分子生物学等方面[16-19]。此外,郑道君等人对海南龙血树野生资源分布、种群更新情况及种子萌发进行了研究[12, 20-21]。近年来,海南龙血树的种群结构和分布格局也有报道,但周文嵩等人仅对昌江地区的海南龙血树种群结构进行了研究[22],李伟杰等人涉及的种群虽多,但仅对海南龙血树种群的年龄结构和分布格局进行了研究,并未对海南龙血树种群的静态生命表、数量动态特征和生存状况进行分析[23]。本文拟以处于不同代表性生境的海南龙血树种群为对象,对它们的年龄结构、数量动态特征与生存状况进行定量研究,预测种群未来的动态趋势,以期从种群生态学方面为海南龙血树种群的保护和恢复提供依据。

1　研究方法

1.1　野外调查

在查阅文献资料的基础上,采用踏查法对海南龙血树种群进行实地调查。海南龙血树主要分布在石灰岩和花岗岩两种生境中,因此,本文对两种生境的 11 个种群进行了调查。其中,石灰岩生境调查了东方市俄贤岭的 2 个种群;花岗岩生境调查了分布于海边的三亚南山和亚龙湾种群、万宁乐南山种群、昌江昌化岭种群,以及分布于非海边的三架岭种群、东方黑岭种群和乐东尖峰岭的 3 个种群(表 1)。各种群的地理位置如图 1 所示。采用路线调查法调查种群内的海南龙血树个体,记录个体的株型、基径、树高及冠幅。

1.2　种群结构分析

1.2.1　种群径级划分

在同一生境下同一树种的龄级和径级对环境的反应规律具有一致性[24]。因此,采用空间推时间的方法,

表 1 海南龙血树种群概况

Table 1 General situation of *Dracaena cambodiana* populations

种群 Population	海拔 /m Altitude	东经 Latitude	北纬 Longitude	个体数量/株 Individual	分布点 Location	生境类型 Habitat type
NS	15	109°09′5.50″	18°18′3.08″	83	三亚市南山	花岗岩
YL	59	109°39′16.50″	18°14′21.78″	19	三亚市亚龙湾	花岗岩
JF	865	108°50′34.51″	18°45′38.86″	40	乐东县尖峰岭	花岗岩
JFH	808	108°50′15.14″	18°45′49.37″	20	乐东县尖峰岭	花岗岩
JFM	219	108°59′53.16″	18°44′37.76″	20	乐东县尖峰岭	花岗岩
CH	170	108°42′21.74″	19°20′8.64″	40	昌江县昌化大岭	花岗岩
SJL	95	108°50′59.06″	19°21′59.77″	21	昌江县三架岭	花岗岩
LN	44	110°24′37.47″	18°40′43.99″	26	万宁市乐南山	花岗岩
HL	194	108°48′45.49″	18°46′30.09″	57	东方市黑岭	花岗岩
EXL	980	109°06′40.31″	19°00′45.09″	40	东方市俄贤岭	石灰岩
EX	230	109°04′11.90″	18°59′58.00″	55	东方市俄贤岭	石灰岩

NS：三亚市南山居群，Nanshan population in Sanya City；YL：三亚市亚龙湾居群，Yalongwan population in Sanya City；JF：乐东县尖峰岭引水头居群，Yinshuitou population on Jianfengling in Ledong County；JFH：乐东县尖峰岭回头湾居群，Huitouwan population on Jianfengling in Ledong County；JFM：乐东县尖峰岭叉河口居群，Chahekou population on Jianfengling in Ledong County；CH：昌江县昌化大岭居群，Changhuadaling population in Changjiang County；SJL：昌江县三架岭居群，Sanjialing population in Changjiang County；LN：万宁市乐南山居群，Lenanshan population in Wanning City；HL：东方市黑岭居群，Heiling population in Dongfang City；EXL：东方市俄贤岭居群，Exianling population in Dongfang City；EX：东方市俄贤岭南浪村居群，Nanlang population on Exianling in Dongfang City

用径级代替龄级分析海南龙血树种群的结构[2, 25]。根据生活史特征和野外调查数据的特点，将海南龙血树种群划分为 13 个径级，每个径级对应相应的龄级。基径（以下用 D 表示）≤3cm 为第Ⅰ龄级，3cm<D≤10cm 为第Ⅱ龄级，D>10cm 的海南龙血树个体以 10cm 作为级差进行龄级划分，100cm<D≤150cm 为第Ⅻ龄级，D>150cm 为第ⅩⅢ龄级。为了方便分析海南龙血树各种群的年龄结构，根据野外调查情况和海南龙血树的生长特点，将Ⅰ、Ⅱ龄级（D≤10cm）的个体划分为幼龄个体，将Ⅲ至Ⅵ龄级（10cm<D≤50cm）划分为中龄个体，Ⅶ至Ⅺ龄级（50cm<D≤100cm）划分为成龄个体，将Ⅻ、ⅩⅢ龄级（D>100cm）划分为老龄个体。

1.2.2 种群年龄结构及动态

采用陈晓德种群结构动态量化分析方法[26]，推导海南龙血树种群年龄结构的动态指数，对种群动态（V）进行定量描述，V_n、V_{pi}、V'_{pi}、V''_{pi}取正、负、零值的意义分别反映种群或相邻年龄级个体数量的增长、衰退、稳定的动态关系[2,25]。

种群龄级间动态指数（V_n）为：

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} 100\%$$

式中：S_n 与 S_{n+1} 分别为第 n 和第 $n+1$ 年龄级的个体数，$-1 \leq V_n \leq 1$。

种群年龄结构的数量变化动态指数（V_{pi}）为：

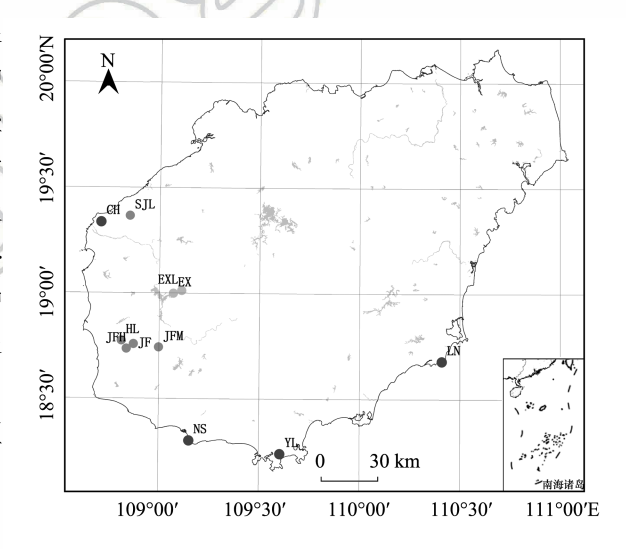


图 1 海南龙血树种群的地理位置

Fig.1 Populations' location of *Dracaena cambodiana*

NS：三亚市南山居群，Nanshan population in Sanya City；YL：三亚市亚龙湾居群，Yalongwan population in Sanya City；JF：乐东县尖峰岭引水头居群，Yinshuitou population on Jianfengling in Ledong County；JFH：乐东县尖峰岭回头湾居群，Huitouwan population on Jianfengling in Ledong County；JFM：乐东县尖峰岭叉河口居群，Chahekou population on Jianfengling in Ledong County；CH：昌江县昌化大岭居群，Changhuadaling population in Changjiang County；SJL：昌江县三架岭居群，Sanjialing population in Changjiang County；LN：万宁市乐南山居群，Lenanshan population in Wanning City；HL：东方市黑岭居群，Heiling population in Dongfang City；EXL：东方市俄贤岭居群，Exianling population in Dongfang City；EX：东方市俄贤岭南浪村居群，Nanlang population on Exianling in Dongfang City

$$V_{pi}=\frac{1}{\sum_{n=1}^{K-1}S_n}\sum_{n=1}^{K-1}(S_nV_n)$$

式中:K 为种群年龄级数量,此值越大,说明种群的增长趋势越大。

考虑种群年龄级数量(K)及种群年龄级个体数(S_n)因素的种群结构动态指数(V'_{pi})为:

$$V'_{pi}=\frac{\sum_{n=1}^{K-1}(S_nV_n)}{K\min(S_1,S_2,S_3,S_4,\cdots,S_K)\sum_{n=1}^{K-1}S_n}$$

此值越大,说明种群抗干扰能力越大,种群稳定性越好。

1.2.3　静态生命表和存活曲线

根据特定时间生命表的编制方法[27],编制海南龙血树种群的静态生命表。静态生命表包含:x 为年龄级;A_x 为 x 龄级内现有个体数;由于静态生命表是用同一时期收集到的种群中的所有个体的径阶编制而成,它只反映了多个世代重叠的年龄动态历程中的一个特定时间,而不是对种群全部生活史的追踪[28-29],因此,生命表的编制中会出现死亡率为负值的情况,为此,本文采取文献中的匀滑技术对数据 A_x 进行处理[27, 30-31],a_x 即为 A_x 匀滑修正后的数据;l_x 为 x 龄级开始时标准化存活个体数;d_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期内标准化死亡个体数;q_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间的死亡率;L_x 为从从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间还存活的个体数;T_x 为从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数;e_x 为进入 x 龄级个体的生命期望或平均期望寿命;K_x 为消失率。通过实测 A_x 值,计算以上各项的值,它们的计算公式分别为:

$$l_x=\left(\frac{a_x}{a_0}\right)\times1000;d_x=l_x-l_{x+1};q_x=\left(\frac{d_x}{l_x}\right)\times1000;L_x=(l_x+l_{x+1})/2;T_x=\sum_x^{\infty}L_x;$$

$$e_x=\frac{T_x}{l_x};K_x=\ln l_x-\ln l_{x+1}。$$

1.2.4　种群生存分析

种群生存分析采用种群生存率函数($S_{(i)}$);累计死亡率函数($F_{(i)}$);死亡率密度函数($f_{(ti)}$)和危险率函数($\lambda_{(ti)}$)[30-31]。计算公式如下:

$S_{(i)}=S_1\times S_2\times S_3\times\cdots\times S_i$;$F_{(i)}=1-S_i$;$f_{(ti)=}\frac{(S_{i-1}-S_i)}{h_i}$;$\lambda_{(ti)}=2(1-S_i)/[h_i(1+S_i)]$式中 S_i 为存活频率其计算公式为:$S_i=\frac{l_{x+1}}{l_x}$,h_i 为龄级宽度。根据上述 4 个生存函数估值绘制生存率曲线、累计死亡率曲线、死亡密度曲线和危险率曲线。生存率函数以种群个体的生存期大于 t 的概率来描述种群的生存规律,曲线单调递减。累计死亡率是描述一个种群在存活期内总体死亡状况的函数,为单调递增函数。生存率函数和累计死亡率函数从两个不同的方面描述种群的生存规律,两者互补。死亡密度函数是表征种群个体在特定时段内的死亡概率,能直观反映种群个体的死亡情况。危险率函数表征种群个体的生存期达到 t 时的瞬时死亡率[31]。

2　结果与分析

2.1　种群年龄结构

分析结果表明,海南龙血树种群的年龄结构与其所处的生境关系密切。NS、YL、CH 和 LN 种群分布在海边的花岗岩生境,它们的特点是:种群中均存在一定比例的中龄、成龄和老龄个体。三亚 NS 种群和 YL 种群的年龄结构中均缺少幼龄个体,幼龄个体占种群个体总数的比例分别为 0 和 5%;中、成龄个体所占的比例较高,分别为 61%和 90%;老龄个体占有一定的比例,分别为 39%和 5%。由于幼龄个体的极度缺乏,NS 和 YL 种群结构均属于衰退型。其中,NS 种群幼龄个体缺失,且拥有更高比例的老龄个体。因此,NS 种群的衰退程度比 YL 种群更大。位于万宁乐南山的 LN 种群幼龄、中龄、成龄和老龄个体所占的比例分别为 27%、46%、19%和 8%,属于稳定型种群。同样,位于昌化大岭的 CH 种群幼、中、成、老龄的个体数量占种群个体总数量

的比例分别为 30%、25%、25%和 20%，其种群年龄结构也属于稳定型种群。相比之下，CH 种群幼、中、成、老龄的个体数量分布较 LN 种群均匀，种群的稳定性更好些，而 LN 种群虽有老龄个体，但其老龄个体比例仅为 8%，偏向于增长型(图 2)。

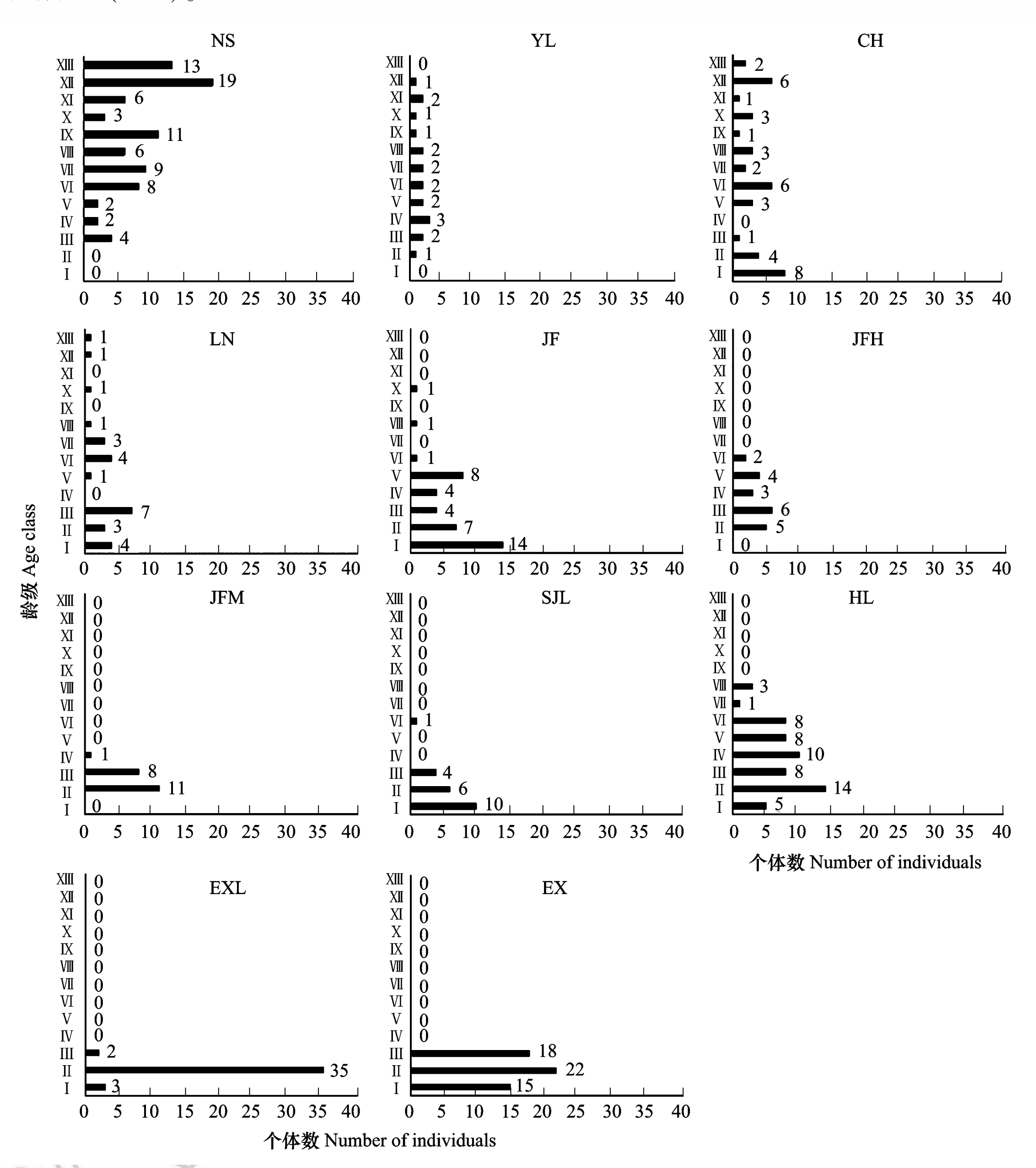


图 2 海南龙血树种群的年龄结构

Fig.2 Age structure of *Dracaena cambodiana* populations

Ⅰ：D(个体基径，basal diameter of individuals) ≤3cm；Ⅱ：3cm<D≤10cm；Ⅲ：10cm<D≤20cm；Ⅳ：20cm<D≤30cm；Ⅴ：30cm<D≤40cm；Ⅵ：40cm<D≤50cm；Ⅶ：50cm<D≤60cm；Ⅷ：60cm<D≤70cm；Ⅸ：70cm<D≤80cm；Ⅹ：80cm<D≤90cm；Ⅺ：90cm<D≤100cm；Ⅻ：100cm<D≤150cm；ⅩⅢ：D>150cm

分布于花岗岩山间斜坡上的种群包括尖峰岭地区的 JF、JFH、JFM 和 HL 种群，以及昌江三架岭的 SJL 种群，它们的年龄结构无老龄个体，成龄的个体极少，种群中个体集中分布在幼、中龄，种群为增长型。其中，JF 种群的幼、中龄比例为 53%和 42%，成龄的个体仅为 5%；HL 种群幼、中龄比例为 33%和 60%，成龄的个体仅为 7%；JFH 和 JFM 幼、中龄比例均为 100%。

位于石灰岩俄贤岭地区的 EXL 和 EX 种群与花岗岩非海边种群的年龄结构类似，无老龄个体，种群中个体集中分布在幼、中龄，种群也属于增长型。但它们没有成龄个体，中龄个体也较少，种群个体主要集中在幼

龄阶段,如,EXL 的幼龄个体占 95%,中龄仅有 5%;EX 幼龄个体占 67%。

2.2　种群年龄结构的动态变化分析

基于种群动态量化分析方法,对海南龙血树 11 个种群相邻龄级间个体数量变化动态及各种群整体数量变化动态进行分析(表 2,表 3)。结果显示,海南龙血树各种群龄级间的个体数量均有明显的波动过程,各种群的结构并不稳定,11 个种群在龄级间多出现了负增长动态,出现龄级间衰退现象的次数在 1/4 以上,最高达到 3/5(JFH)。Ⅰ-Ⅳ龄级在大部分种群中存在,但是 10 个种群(NS 不存在Ⅰ和Ⅱ龄级)中,有 6 个种群在Ⅰ和Ⅱ龄级之间出现衰退现象,表明Ⅰ向Ⅱ龄级时有严重的环境筛,导致Ⅰ向Ⅱ龄级过渡时极易出现高死亡率;Ⅲ和Ⅳ龄级之间的衰退现象较少,9 个种群(EX 和 EXL 没有Ⅲ龄级)中仅 2 个种群出现负增长,表明Ⅲ向Ⅳ龄级过渡时环境条件较为合适,种群稳定。此外,有 6 个种群存在Ⅵ向Ⅶ龄级过渡,其中有 5 个种群的年龄结构动态指数等于或大于零,仅 NS 的为负数,且仅为 11.11%,表明这个阶段也是较为稳定的。

表 2　海南龙血树种群的年龄结构动态指数(V_n/%)

Table 2　Age structure dynamic index of *Dracaena cambodiana* population

龄级/种群 Age class/Population	NS	LN	YL	CH	JF	JFH	JFM	HL	SJL	EX	EXL
Ⅰ	—	25.00	-100.00	50.00	50.00	-100.00	-100.00	-64.29	40.00	-31.82	-91.43
Ⅱ	—	-57.14	-50.00	75.00	42.86	-16.67	27.27	42.86	33.33	18.18	94.29
Ⅲ	50.00	100.00	-33.33	100.00	0.00	50.00	87.50	-20.00	100.00	—	—
Ⅳ	0.00	-100.00	33.33	-100.00	-50.00	-25.00	—	20.00	—	—	—
Ⅴ	-75.00	-75.00	0.00	-50.00	87.50	50.00	—	0.00	-100.00	—	—
Ⅵ	-11.11	25.00	0.00	66.67	100.00	—	—	87.50	—	—	—
Ⅶ	33.33	66.67	0.00	-33.33	-100.00	—	—	-66.67	—	—	—
Ⅷ	-45.45	100.00	50.00	66.67	100.00	—	—	—	—	—	—
Ⅸ	72.73	-100.00	0.00	-66.67	-100.00	—	—	—	—	—	—
Ⅹ	-50.00	100.00	-50.00	66.67	—	—	—	—	—	—	—
Ⅺ	-68.42	-100.00	50.00	-83.33	—	—	—	—	—	—	—
Ⅻ	31.58	0.00	—	66.67	—	—	—	—	—	—	—
ⅩⅢ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Ⅰ: D(个体基径, basal diameter of individuals)≤3cm; Ⅱ: 3cm<D≤10cm; Ⅲ: 10cm<D≤20cm; Ⅳ: 20cm<D≤30cm; Ⅴ: 30cm<D≤40cm; Ⅵ: 40cm<D≤50cm; Ⅶ: 50cm<D≤60cm; Ⅷ: 60cm<D≤70cm; Ⅸ: 70cm<D≤80cm; Ⅹ: 80cm<D≤90cm; Ⅺ: 90cm<D≤100cm; Ⅻ: 100cm<D≤150cm; ⅩⅢ: D>150cm; "—"代表空值, "—" means null values

种群总体动态变化指数分析结果表明,11 个种群均为增长型种群,种群总体动态变化指数 V_{pi} 均大于 0。在这 11 个种群中,EXL 种群的 V_{pi} 值最大,达到 84.89%,显示出最高的增长趋势,同时 V'_{pi} 值最大,为14.15%,种群抗干扰能力强,种群稳定性好。其次,V_{pi} 值大于 40%以上的种群依次为 JFM、EX、JF、CH 和 LN 种群,也显示出较高的增长趋势,其中,JFM 的 V_{pi} 值为 52.63%,是 EXL 种群 V_{pi} 值的 0.62 倍,但它的 V'_{pi} 值是 13.16%,抗干扰能力和稳定性近接 EXL 种群;EX 种群虽然具较高的 V_{pi} 值,但其抗干扰能力和稳定性较差,V'_{pi} 值为 1.04%,仅略高于 NS。SJL、JFH 和 HL 种群增长趋势较低,V_{pi} 值分别为 20%、18.98%和 17.63%,其中 SJL 的 V_{pi} 值为 CH 的 0.47 倍,但 V'_{pi} 值为 3.33%,略高于 CH。NS 和 YL 种群总体动态变化指数 V_{pi} 值虽然大于 0,但仅为 11.38%和 7.4%;V'_{pi} 值也极低,仅为 0.45%和 0.67%,种群波动大,种群稳定性差,种群抗干扰能力极低;而且种群结构中幼龄个体极度缺乏,成、老龄个体比例高。因此,NS 和 YL 应属衰退型种群。

2.3　静态生命表及存活曲线

海南龙血树各种群的静态生命表如表 4 所示,以龄级为 x 轴,以 $\ln l_x$、q_x、k_x 为 y 轴绘制各种群的存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线如图 3 和图 4 所示。种群存活曲线是对种群的死亡过程的直观描述,由于匀滑处理会掩盖种群数量波动中的某些生态现象[32],因此,本文将匀滑处理前后的种群存活曲线进行对比。

表 3 海南龙血树种群的动态指数(V_{pi}、V'_{pi}/%)

Table 3 Dynamic index (V_{pi}, V'_{pi}) of *Dracaena cambodiana* population

种群/动态指数 Population/Dynamic index	V_{pi}	V'_{pi}	种群/动态指数 Population/Dynamic index	V_{pi}	V'_{pi}
NS	11.38	0.45	JFM	52.63	13.16
CH	42.98	3.31	HL	17.63	2.52
LN	42.14	3.24	SJL	20.00	3.33
YL	7.41	0.67	EXL	84.89	14.15
JF	45	4.5	EX	46.57	1.04
JFH	18.98	1.58			

V_{pi}：种群年龄结构的数量变化动态指数，dynamic index of quantitative change in population age structure；V'_{pi}：考虑种群年龄级数量及种群年龄级个体数因素的种群结构动态指数，population structure dynamic index considering population age class number and individual number in each population age class

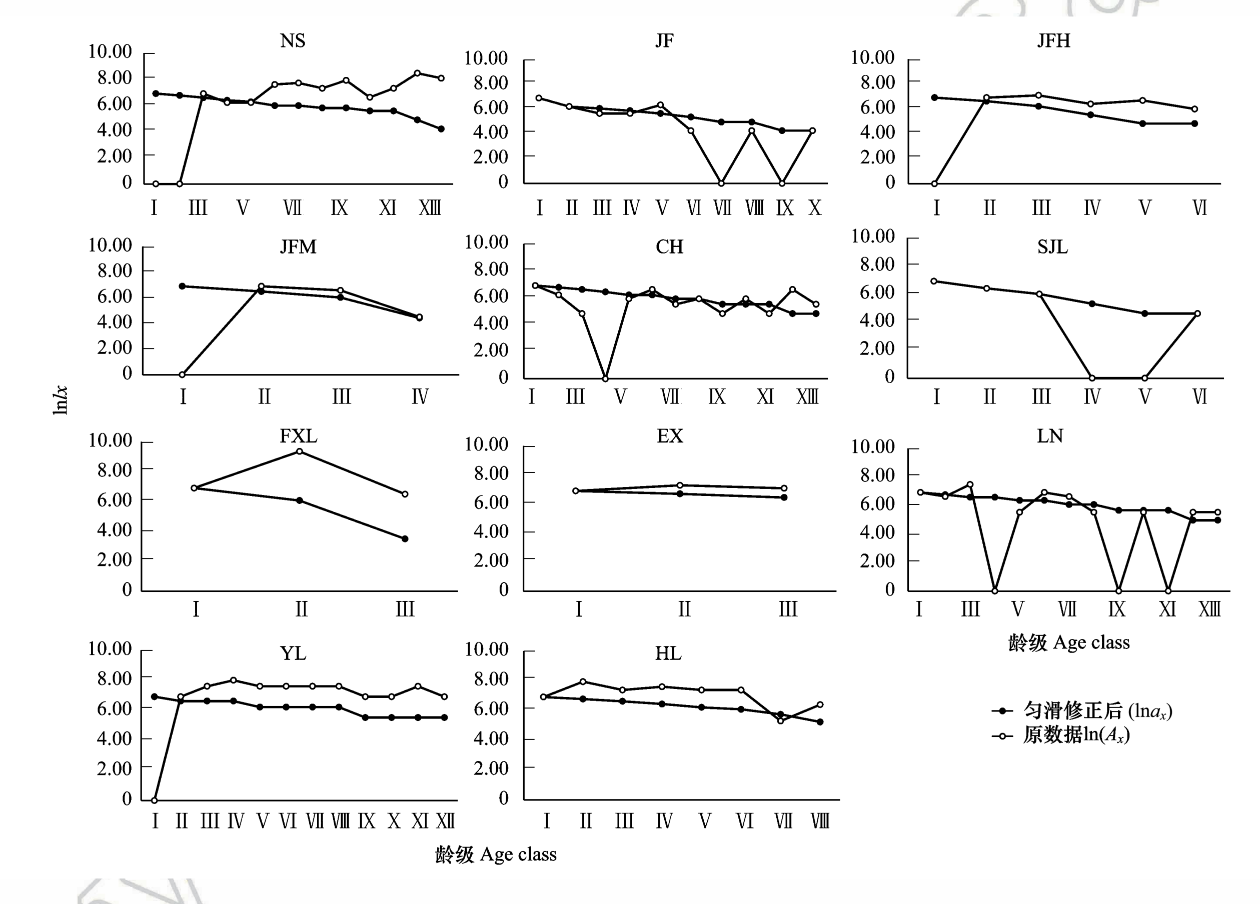


图 3 海南龙血树种群的存活曲线

Fig.3 Survival curve of *Dracaena cambodiana* populations

从存活曲线看，11 个海南龙血树种群均属于 Deevey-Ⅰ型，呈现凸型，生命期望值 e_x 随着龄级的增长而呈现不断下降的趋势，表明海南龙血树的生存能力随着年龄的增加而下降，而且其生命期望值通常在老龄阶段的下降趋势更显著，种群幼龄和中幼龄个体的生命期望通常相差不大，说明海南龙血树幼龄及中幼龄个体的生存能力较好，接近老龄时个体生存能力较差。图 4 也显示海南龙血树种群幼龄个体的存活率高于中龄个体和老龄个体，幼龄个体的死亡率和消失率小于中、老龄个体(图 3)。

2.4 种群生存分析

NS、YL、CH、EX、LN 和 HL 种群累计死亡率的起始值较低，函数值≤0.2；JF、JFH、JFM 和 SJL 种群累计死亡率的起始值较高，函数值在 0.2—0.4 之间；EXL 种群累计死亡率的起始值最高，函数值为 0.67，表明 EXL 种

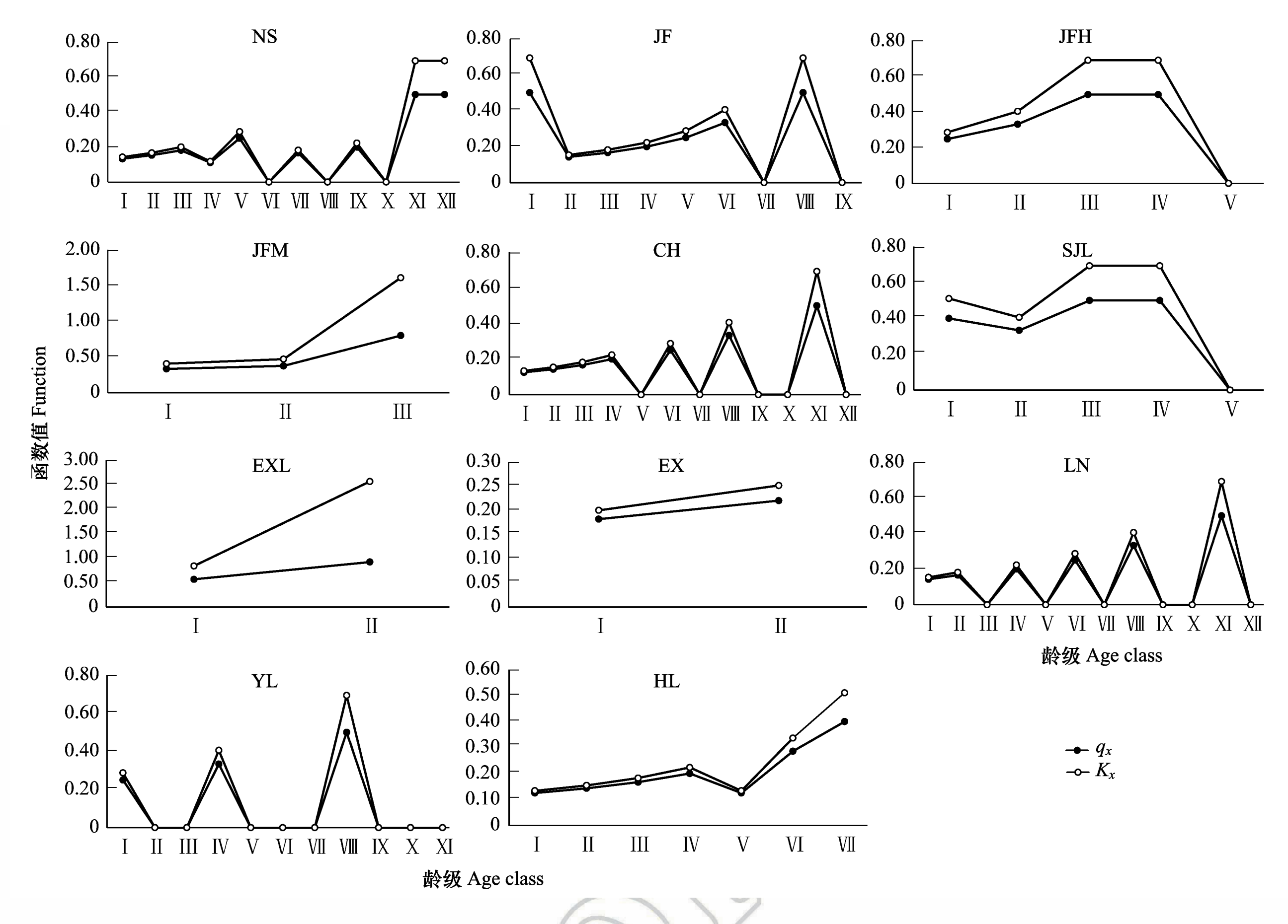


图 4　海南龙血树种群的死亡率(q_x)和消失率(K_x)

Fig.4　Mortality and killing power of *Dracaena cambodiana* populations

群所处的生境对龄级Ⅰ个体的环境筛作用较强。NS、JF、JFH、JFM、SJL、EXL 种群的累计死亡曲线呈现出前期变化幅度大,中后期变化幅度变小的特点;YL 的累计死亡曲线呈现出波动性变化,Ⅰ到Ⅱ龄级、Ⅳ到Ⅵ龄级、Ⅷ到Ⅹ龄级的死亡累计率无变化,其余各龄级间的变化幅度基本一致;CH、EX、LN、HL 种群的累计死亡曲线呈现出早中晚龄期变化幅度基本一致的特点(图 5)。

表 4　海南龙血树种群的静态生命表

Table 4　Static life table of *Dracaena cambodiana* population

种群 Population	龄级 Age class	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
NS	Ⅰ	0	15	1000	6.91	133	0.13	933	5300	5.30	0.14
	Ⅱ	0	13	867	6.76	133	0.15	800	4467	5.15	0.17
	Ⅲ	4	11	733	6.60	133	0.18	667	3700	5.05	0.20
	Ⅳ	2	9	600	6.40	67	0.11	567	3033	5.06	0.12
	Ⅴ	2	8	533	6.28	133	0.25	467	2467	4.63	0.29
	Ⅵ	8	6	400	5.99	0	0.00	400	2000	5.00	0.00
	Ⅶ	9	6	400	5.99	67	0.17	367	1600	4.00	0.18
	Ⅷ	6	5	333	5.81	0	0.00	333	1233	3.70	0.00
	Ⅸ	11	5	333	5.81	67	0.20	300	900	2.70	0.22
	Ⅹ	3	4	267	5.59	0	0.00	267	600	2.25	0.00
	Ⅺ	6	4	267	5.59	133	0.50	200	333	1.25	0.69
	Ⅻ	19	3	133	4.89	67	0.50	100	133	1.00	0.69

续表

种群 Population	龄级 Age class	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
	XⅢ	13	1	67	4.20	67	1.00	33	33	0.50	4.20
JF	Ⅰ	14	14	1000	6.91	500	0.50	750	2714	2.71	0.69
	Ⅱ	7	7	500	6.21	71	0.14	464	1964	3.93	0.15
	Ⅲ	4	6	429	6.06	71	0.17	393	1500	3.50	0.18
	Ⅳ	4	5	357	5.88	71	0.20	321	1107	3.10	0.22
	Ⅴ	8	4	286	5.65	71	0.25	250	786	2.75	0.29
	Ⅵ	1	3	214	5.37	71	0.33	179	536	2.50	0.41
	Ⅶ	0	2	143	4.96	0	0.00	143	357	2.50	0.00
	Ⅷ	1	2	143	4.96	71	0.50	107	214	1.50	0.69
	Ⅸ	0	1	71	4.27	0	0.00	71	107	1.50	0.00
	Ⅹ	1	1	71	4.27	71	1.00	36	36	0.50	4.27
JFH	Ⅰ	0	8	1000	6.91	250	0.25	875	2188	2.19	0.29
	Ⅱ	5	6	750	6.62	250	0.33	625	1375	1.83	0.41
	Ⅲ	6	4	500	6.21	250	0.50	375	750	1.50	0.69
	Ⅳ	3	2	250	5.52	125	0.50	188	375	1.50	0.69
	Ⅴ	4	1	125	4.83	0	0.00	125	188	1.50	0.00
	Ⅵ	2	1	125	4.83	125	1.00	63	63	0.50	4.83
JFM	Ⅰ	0	12	1000	6.91	333	0.33	833	833	0.83	0.41
	Ⅱ	11	8	667	6.50	250	0.38	542	542	0.81	0.47
	Ⅲ	8	5	417	6.03	333	0.80	250	250	0.60	1.61
	Ⅳ	1	1	83	4.42	83	1.00	42	42	0.50	4.42
CH	Ⅰ	8	8	1000	6.91	125	0.13	938	5500	5.50	0.13
	Ⅱ	4	7	875	6.77	125	0.14	813	4563	5.21	0.15
	Ⅲ	1	6	750	6.62	125	0.17	688	3750	5.00	0.18
	Ⅳ	0	5	625	6.44	125	0.20	563	3063	4.90	0.22
	Ⅴ	3	4	500	6.21	0	0.00	500	2500	5.00	0.00
	Ⅵ	6	4	500	6.21	125	0.25	438	2000	4.00	0.29
	Ⅶ	2	3	375	5.93	0	0.00	375	1563	4.17	0.00
	Ⅷ	3	3	375	5.93	125	0.33	313	1188	3.17	0.41
	Ⅸ	1	2	250	5.52	0	0.00	250	875	3.50	0.00
	Ⅹ	3	2	250	5.52	0	0.00	250	625	2.50	0.00
	Ⅺ	1	2	250	5.52	125	0.50	188	375	1.50	0.69
	Ⅻ	6	1	125	4.83	0	0.00	125	188	1.50	0.00
	XⅢ	2	1	125	4.83	125	1.00	63	63	0.50	4.83
SJL	Ⅰ	10	10	1000	6.91	400	0.40	800	1900	1.90	0.51
	Ⅱ	6	6	600	6.40	200	0.33	500	1100	1.83	0.41
	Ⅲ	4	4	400	5.99	200	0.50	300	600	1.50	0.69
	Ⅳ	0	2	200	5.30	100	0.50	150	300	1.50	0.69
	Ⅴ	0	1	100	4.61	0	0.00	100	150	1.50	0.00
	Ⅵ	1	1	100	4.61	100	1.00	50	50	0.50	4.61
EXL	Ⅰ	3	30	1000	6.91	567	0.57	717	967	0.97	0.84
	Ⅱ	35	13	433	6.07	400	0.92	233	250	0.58	2.56
	Ⅲ	2	1	33	3.51	33	1.00	17	17	0.50	3.51
EX	Ⅰ	15	22	1000	6.91	182	0.18	909	1955	1.95	0.20
	Ⅱ	22	18	818	6.71	182	0.22	727	1045	1.28	0.25
	Ⅲ	18	14	636	6.46	636	1.00	318	318	0.50	6.46

续表

种群 Population	龄级 Age class	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
LN	Ⅰ	4	7	1000	6.91	143	0.14	929	5929	5.93	0.15
	Ⅱ	3	6	857	6.75	143	0.17	786	5000	5.83	0.18
	Ⅲ	7	5	714	6.57	0	0.00	714	4214	5.90	0.00
	Ⅳ	0	5	714	6.57	143	0.20	643	3500	4.90	0.22
	Ⅴ	1	4	571	6.35	0	0.00	571	2857	5.00	0.00
	Ⅵ	4	4	571	6.35	143	0.25	500	2286	4.00	0.29
	Ⅶ	3	3	429	6.06	0	0.00	429	1786	4.17	0.00
	Ⅷ	1	3	429	6.06	143	0.33	357	1357	3.17	0.41
	Ⅸ	0	2	286	5.65	0	0.00	286	1000	3.50	0.00
	Ⅹ	1	2	286	5.65	0	0.00	286	714	2.50	0.00
	Ⅺ	0	2	286	5.65	143	0.50	214	429	1.50	0.69
	Ⅻ	1	1	143	4.96	0	0.00	143	214	1.50	0.00
	ⅩⅢ	1	1	143	4.96	143	1.00	71	71	0.50	4.96
YL	Ⅰ	0	4	1000	6.91	250	0.25	875	5625	5.63	0.29
	Ⅱ	1	3	750	6.62	0	0.00	750	4875	6.50	0.00
	Ⅲ	2	3	750	6.62	0	0.00	750	4125	5.50	0.00
	Ⅳ	3	3	750	6.62	250	0.33	625	3375	4.50	0.41
	Ⅴ	2	2	500	6.21	0	0.00	500	2750	5.50	0.00
	Ⅵ	2	2	500	6.21	0	0.00	500	2250	4.50	0.00
	Ⅶ	2	2	500	6.21	0	0.00	500	1750	3.50	0.00
	Ⅷ	2	2	500	6.21	250	0.50	375	1250	2.50	0.69
	Ⅸ	1	1	250	5.52	0	0.00	250	875	3.50	0.00
	Ⅹ	1	1	250	5.52	0	0.00	250	625	2.50	0.00
	Ⅺ	2	1	250	5.52	0	0.00	250	375	1.50	0.00
	Ⅻ	1	1	250	5.52	250	1.00	125	125	0.50	5.52
HL	Ⅰ	5	16	1000	6.91	125	0.13	938	4094	4.09	0.13
	Ⅱ	14	14	875	6.77	125	0.14	813	3156	3.61	0.15
	Ⅲ	8	12	750	6.62	125	0.17	688	2344	3.13	0.18
	Ⅳ	10	10	625	6.44	125	0.20	563	1656	2.65	0.22
	Ⅴ	8	8	500	6.21	63	0.13	469	1094	2.19	0.13
	Ⅵ	8	7	438	6.08	125	0.29	375	625	1.43	0.34
	Ⅶ	1	5	313	5.74	125	0.40	250	250	0.80	0.51
	Ⅷ	3	3	188	5.23	188	1.00	94	94	0.50	5.23

A_x:x 龄级内现有的个体数, individual number of age class x;a_x:Ax 匀滑修正后的数据, the revised data of A_x;l_x:x 龄级开始时标准化存活个体数, the standardized number of surviving individuals of age class x;$\ln l_x$: lx 的自然对数,the natural logarithm of l_x;d_x:从 x 到 x+1 龄级间隔期内标准化死亡个体数, the standardized number of death individuals from age class x to age class x+1;q_x:从 x 到 x+1 龄级间隔期间的死亡率, mortality from age class $x$to age class x+1;L_x:从 x 到 x+1 龄级间隔期间还存活的个体数, the number of surviving individuals from age class x to age class x+1;T_x:从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数, the total individual number of age class $x$and age classes older than x;e_x:进入 x 龄级个体的生命期望, life expectancy of individuals in the age class x;K_x:消失率, disappearance rate

各种群的死亡密度函数曲线和危险率动态基本相似,在Ⅰ龄级向Ⅱ龄级过渡过程中变化幅度较大,后面各龄级间的变化趋势趋于平稳,除 EXL 种群外,其他种群的危险率函数呈现先减小后增大的趋势,说明海南龙血树种群在整个生活史中中期稳定,早期和晚期较为脆弱(图 6)。

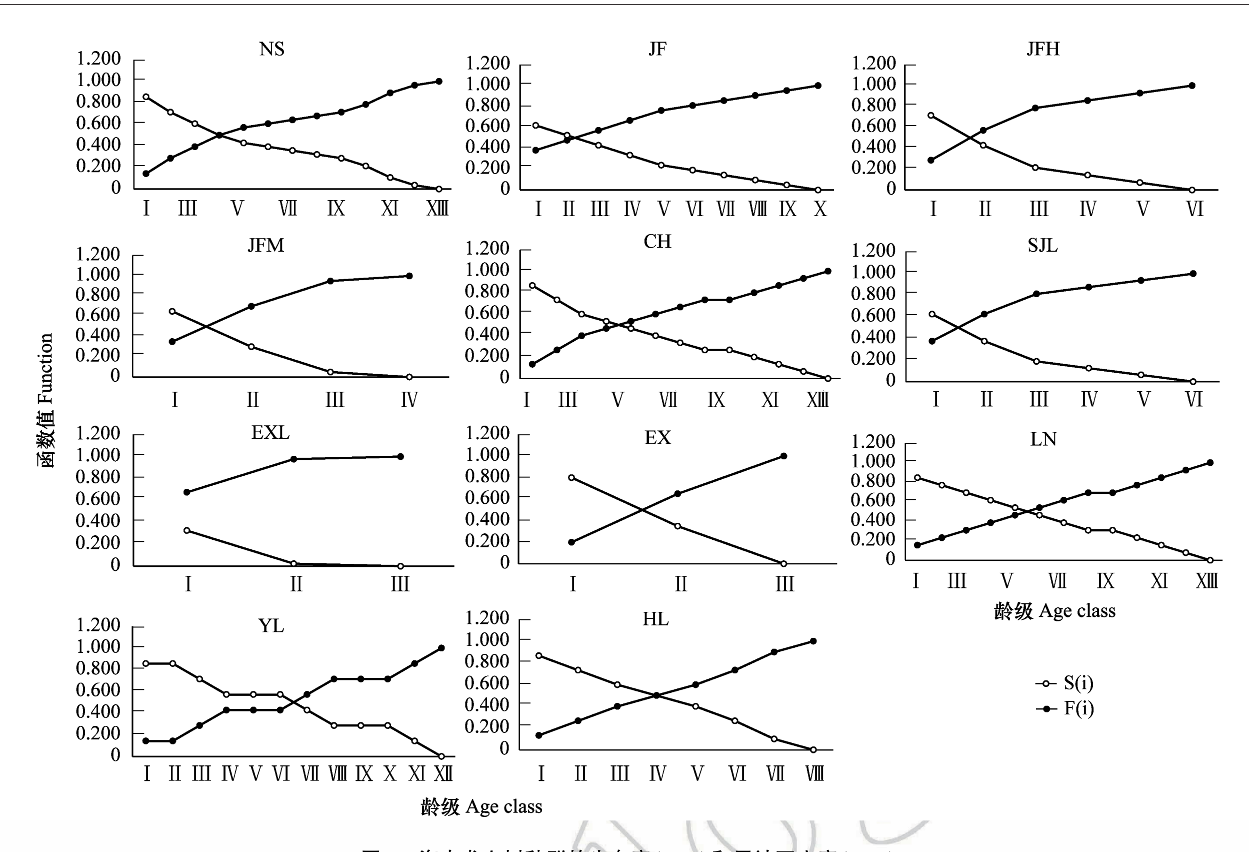


图 5 海南龙血树种群的生存率($S_{(i)}$)和累计死亡率($F_{(i)}$)

Fig.5 Survival rate and accumulated mortality rate curve of *Dracaena cambodiana* populations

3 讨论

3.1 海南龙血树种群结构及生存现状

植物种群龄级结构是其生物学特征与环境因素共同作用的结果[33-34]。李伟杰等人[23]对昌江昌化岭、三亚大小洞天、万宁东澳镇和东方江边乡及天安乡海南龙血树种群的年龄结构进行分析后认为这些种群的结构均为衰退型;周文嵩等人[22]对昌江地区的海南龙血树种群年龄结构进行分析后认为昌江地区的海南龙血树种群也为衰退型。本文对海南龙血树不同生境下 11 个种群的年龄结构及种群结构动态指数分析的综合结果显示,海南龙血树种群结构与种群所处的生境关系密切,位于海边的 NS 和 YL 种群结构为衰退型,CH、LN 种群为稳定型,而位于非海边生境的其他 7 个种群为增长型。这一结果与以上两人的研究结果有一定差异。造成这种差异的原因可能是龄级划分标准、调查研究区域和研究方法的不同。由于海南龙血树种群中的很多个体都没有明显的主干,无法获得个体胸径,因此本研究中未用胸径,而是采用基径划分海南龙血树的个体年龄级别,而且将 D≤10cm 的个体划分为幼龄个体,这一划分标准可能将更多的海南龙血树个体划分成了幼龄个体。本研究调查的区域更广,处于尖峰岭保护区内的种群有 4 个,在海拔 800m 以上的种群有 2 个,它们不易受到人为干扰和破坏,跟其他种群相比,种群中的幼龄个体更多。本研究在尖峰岭 JF 种群中发现了较多数量的实生小苗,这是在其他种群中没有的现象。此外,本研究用年龄结构和种群结构动态指数两种方法来综合分析海南龙血树种群的结构,比仅用单一的年龄结构分析可能更准确。

缺乏可更新的幼龄个体将导致种群趋于衰退[35]。海南龙血树的自然更新方式有种子更新、根蘖更新和桩蘖更新 3 种方式,其中后两种属于无性繁殖;目前的研究均显示海南龙血树种群中极少见到实生苗,种群更新不良,其更新方式以无性繁殖为主[20,23]。本研究结果与前人的基本一致,在调查到的 11 个海南龙血树种群中,仅在 JF、LN 和 SJL 种群记录到 2 年生左右的实生苗,其他种群中极少见到实生苗;在 CH 种群中发现的幼苗均为根蘖苗或桩蘖苗,是被砍伐后残留的海南龙血树根或桩上萌生的幼苗。海南龙血树种子萌发和幼苗

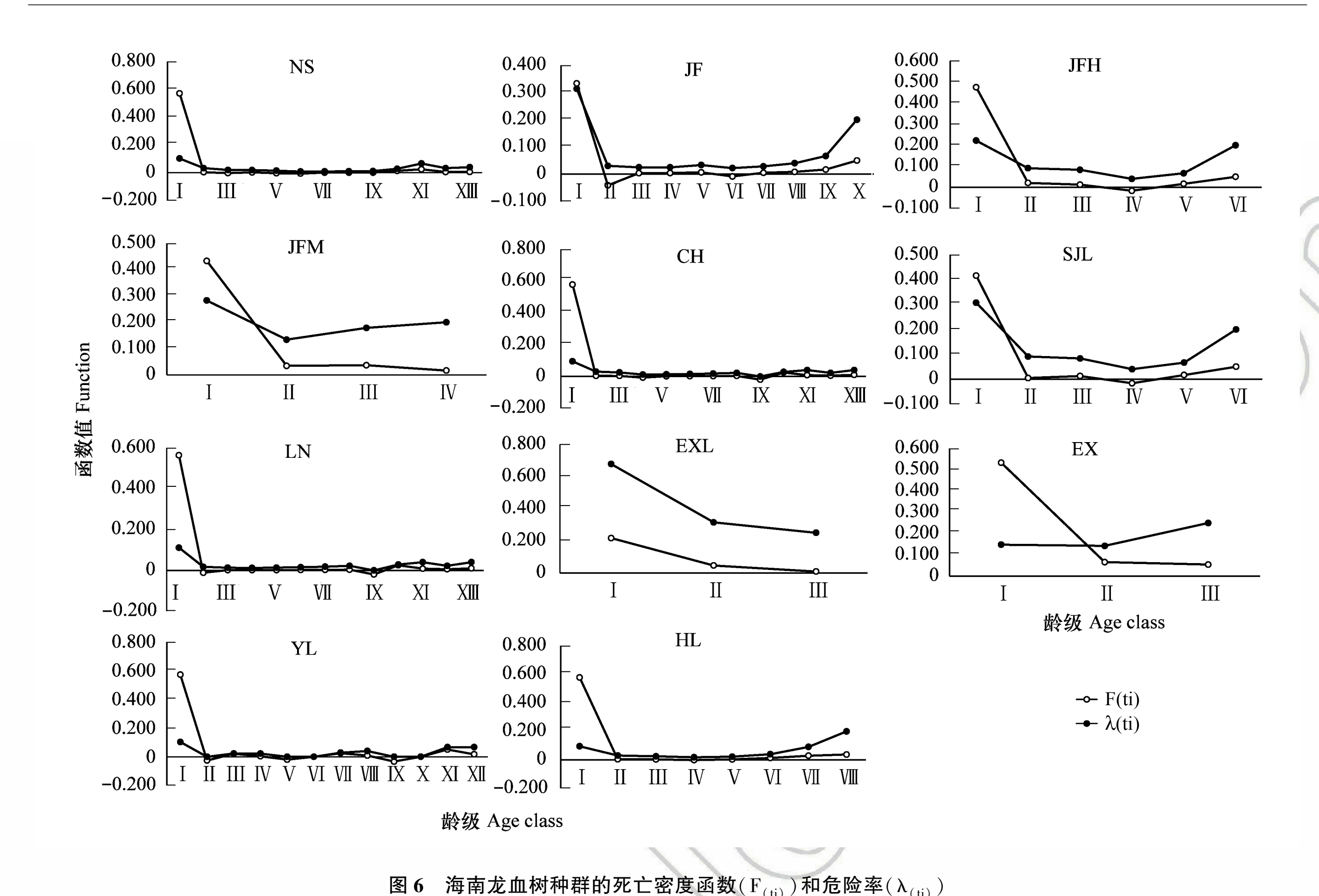


图 6　海南龙血树种群的死亡密度函数($F_{(ti)}$)和危险率($\lambda_{(ti)}$)

Fig.6　Morality density and hazard rate curve of *Dracaena cambodiana* populations

生长对生境的依赖性较高,需要一定的遮荫环境,但遮荫度较好的 NS 和 YL 种群中没有发现幼苗的存在,且幼龄个体都极度缺乏,导致 NS 和 YL 种群成为衰退种群。在调查 NS 和 YL 种群时正值海南龙血树的结果期,但调查过程中仅发现已枯萎的花序,并未见到其果实,因此推测是否是因为种群个体无法结实才导致 NS 和 YL 种群缺少幼苗和幼龄个体而成为衰退种群。这一推测还有待于繁殖生态学方面的研究来验证。JF、JFM、JFH、HL、EXL、EX 和 SJL 种群仅有前 3 龄级的个体或缺少Ⅶ龄级以后的中老龄个体,说明这 7 个种群的形成时间较短,是正在发展的种群。

3.2　海南龙血树种群的动态趋势

生命表是判断植物种群发展趋势的重要指标,通过建立种群静态生命表、绘制存活曲线及生存函数曲线可以对海南龙血树种群动态进行分析。种群静态生命表和绘制存活曲线分析结果显示 11 个海南龙血树种群的存活曲线均属于 Deevey-Ⅰ型,海南龙血树幼龄个体的生存能力较好,存活率高于中龄个体和老龄个体,老龄个体生存能力较差;但生存函数分析的结果显示海南龙血树种群生活史早期和晚期脆弱,中期稳定,这说明海南龙血树种群所处的生境更适合成年海南龙血树的生存,虽然幼龄树自身的生存能力较强,但现有的生境对幼龄个体的环境筛作用较强,对幼龄树的生存不利,这一点与郑道君等人[21]的研究结果一致。

植物种群的发展是一个漫长而复杂的过程,涉及到物种内和物种间的竞争,还涉及到物种与无机环境之间的适应过程。海南龙血树在种群发展的漫长过程中,适应了严酷的岩石生境,对种群分布及种群结构与动态的综合分析后可以看出,位于海边生境的海南龙血树种群是古老种群,处于稳定发展中或正趋于衰退;而位于非海边的种群则是年轻种群,是增长型种群。由此推断海南龙血树种群正在由海边的岩石生境向非海边的岩石生境转移,这一推测还需要分子生物学和生物地理学方面的研究结果来验证。

3.3　海南龙血树种群的保护与恢复措施

根据种群聚集程度的不同,物种可分为补偿物种、中性物种和退偿物种三个类别,补偿物种不易灭绝,退

偿物种容易灭绝,当退偿物种的种群数量小于该物种的最小存活种群 K0 时,该物种趋于灭绝[36]。海南龙血树在石灰岩生境中为集群分布,在花岗岩生境中为均匀分布,已被列入中国珍稀濒危保护植物名录,应属于退偿物种。人类对海南龙血树野生资源的掠夺性采挖和对其生境的破坏造成海南龙血树野生资源的分布范围缩减,分布点数量变少。从目前的文献和本研究的调查结果来看,野生海南龙血树种群的分布点不会超过 20 个,而且多数种群内的个体数量很少,在 100 株以下;目前种群估测数量能在 500 株以上的仅有三亚的大小洞天、昌江的昌化大岭和万宁的大洲岛,其中大洲岛的海南龙血树种群是目前发现的保存最为完好的种群,具有重要的科学研究价值。

综上所述,为了防止海南龙血树这一物种的灭绝,海南龙血树种群的保护工作刻不容缓。对濒危植物的保护目前主要有三种方法:就地保护、迁地保护和利用现代生物技术的保护[37]。近年来,随着对极小种群野生植物拯救保护工程的进行,一种新的野生植物保护方法"近地保护"被提了出来,即在物种现有分布区(点)范围内的附近,选择与其相同气候和相似的生境建立人工保护点[38]。此方法经中科院西双版纳热带植物园的比较论证,认为它对稀有、濒危植物的保护,大大优于通常的迁地保护,是一种行之有效的新保护方法[39]。在就地保护中,对于生活史中存在薄弱环节的濒危物种种群,可以采用人工辅助措施,如采用实验室辅助种子萌发,待幼苗长至一定大小时,再移植回原种群[40]。

根据本文的分析结果,对海南龙血树种群的保护应采取多种保护方法相结合的方式。对于缺少幼龄个体的种群可以采用人工辅助措施获得该种群的实生幼苗,然后将幼苗移植回该种群,如 NS、YL 和 CH 种群可以采取此方式。对于处于易受人为干扰生境下的种群,可以根据种群的情况选择迁地保护或近原地保护方式保护这类种群的遗传多样性,如 LN、EX、SJL 种群可以采取此方式。而对于已在保护区内海南龙血树种群,如 EXL、JF、JFH、JFM、HL 种群,可以根据种群的实际情况,利用人工辅助措施促进种群的天然更新能力,如扰动土壤以促进种子落入土壤、伐除母树和幼苗周围的乔灌木、增加土壤养分等,可以促进母树的结实,提高幼苗的生长量,增加幼苗的密度。加强对海南龙血树遗传多样性的研究,明确其濒危的内在原因对海南龙血树种群的保护极其重要。建立异地种质资源圃来保存现存海南龙血树的核心种质,以防现存种群因人为或自然原因而突然消失从而造成海南龙血树遗传多样性进一步丢失。

参考文献(References):

[1] 姜汉侨, 段昌群, 杨树华, 王崇云, 苏文华. 植物生态学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2010.

[2] 韩路, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态. 生态学报, 2014, 34(16): 4640-4651.

[3] 汪洋, 冷艳芝, 苏长江, 宋丛文, 程德华, 操英南, 张敏, 付翠林. 恩施天然红椿种群结构及空间分布格局. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 17-25.

[4] 刘普幸. 疏勒河中下游绿洲胡杨种群结构与动态研究. 自然资源学报, 2011, 26(3): 429-439.

[5] Armesto J J, Casassa I, Dollenz O. Age structure and dynamics of Patagonian beech forests in Torres del Paine National Park, Chile. Vegetatio, 1992, 98(1): 13-22.

[6] Fuchs M A, Krannitz P G, Harestad A S. Factors affecting emergence and first-year survival of seedlings of Garry oaks (*Quercus garryana*) in British Columbia, Canada. Forest Ecology and Management, 2000, 137(1/3): 209-219.

[7] 广东省植物研究所. 海南植物志(第四卷). 北京: 科学出版社, 1977: 155.

[8] Chen X Q, Turland N J. *Dracaena* Vandelli ex Linnaeus // Wu Z Y, Raven P H. Flora of China, Vol. 24. Beijing: Science Press and St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2000: 215-217.

[9] 中国科学院植物研究所. 中国数字植物标本馆. http://www.nhpe.org/cvh/.[2017-08-12]

[10] 国家环境保护局, 中国科学院植物研究所. 中国珍稀濒危保护植物名录(第一册). 北京: 科学出版社, 1987: 1-38.

[11] 罗赫, 黄世满. 海南龙血古树优势群丛的调查. 热带林业, 2007, 35(4): 50-51, 41-41.

[12] 郑道君, 云勇, 吴宇佳, 李海文, 张治礼. 海南龙血树野生资源分布及其与水热关系的分析. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(4): 326-332.

[13] 郑道君, 谢良商, 王盈, 张治礼, 张文. 中国血竭基源植物的研究与利用. 中国野生植物资源, 2009, 28(6): 15-20.

[14] 梅文莉, 戴好富, 吴娇, 庄令, 洪葵. 海南龙血树抗肿瘤新用途研究. 中药材, 2005, 28(10): 871-873.

[15] 杨先会, 邓世明, 范丽霞. 海南龙血树植物资源的开发利用. 海南大学学报: 自然科学版, 2004, 22(3): 270-272.

[16] 杨本鹏, 张树珍, 蔡文伟, 宋启示, 王兴红, 王东, 杨学, 顾丽红, 冯翠莲, 王俊刚, 罗遵喜. 海南龙血树组织培养过程中血竭形成的诱导. 热带作物学报, 2009, 30(2): 181-185.

[17] Luo Y, Dai H F, Wang H, Mei W L. Chemical constituents from dragon's blood of *Dracaena cambodiana*. Chinese Journal of Natural Medicines, 2011, 9(2): 112-114.

[18] 罗冠勇, 钟云芳, 宋希强, 戴好富, 杨冬华. 海南龙血树基于愈伤组织诱导途径的组培快繁技术体系优化. 热带作物学报, 2012, 33(10): 1824-1828.

[19] Zheng D J, Xie L S, Zhu J H, Zhang Z L. Low genetic diversity and local adaptive divergence of *Dracaena cambodiana* (Liliaceae) populations associated with historical population bottlenecks and natural selection: an endangered long-lived tree endemic to Hainan Island, China. Plant Biology, 2012, 14(5): 828-838.

[20] 郑道君, 李海文, 云勇, 张浪, 张治礼. 海南龙血树种群生境及自然更新能力调查. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(6): 627-632.

[21] 郑道君, 吴宇佳, 云勇, 姜殿强, 陈宣, 张治礼. 濒危植物海南龙血树种子萌发及其环境适应性分析. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(1): 71-79.

[22] 周文嵩, 冯丹丹, 李东海, 陶楚, 万春红, 邢莎莎, 杨小波. 海南昌江县濒危药用植物的种群动态. 热带生物学报, 2014, 5(4): 392-399.

[23] 李伟杰, 肖艳, 杨海建, 陈沂章, 曾琳, 何明军, 郑希龙. 海南龙血树种群的年龄结构及分布格局. 氨基酸和生物资源, 2017, 39(1): 17-24.

[24] 张维, 李海燕, 赖晓辉, 杨允菲. 新疆天山峡谷不同坡向野核桃种群分布格局. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3105-3113.

[25] 李肇晨, 陈永富, 洪小江, 韩文涛, 李小成. 海南霸王岭陆均松种群年龄结构与点格局分布特征. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1507-1515.

[26] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究. 生态学报, 1998, 18(2): 214-217.

[27] 江洪. 云杉种群生态学. 北京: 中国林业出版社, 1992.

[28] Silvertown J W. 植物种群生态学导论. 祝宁, 王义弘, 陈文斌, 译. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1987.

[29] 吴承祯, 洪伟. 杉木数量经营学引论. 北京: 中国林业出版社, 2000.

[30] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 闫淑君, 蓝斌. 黄山松种群统计分析. 林业科学, 2002, 38(1): 61-67.

[31] 苏建荣, 刘万德, 缪迎春, 李帅锋, 郎学东. 云南红豆杉种群生物学(第三十一版). 北京: 科学出版社, 2016.

[32] 李晓笑, 王清春, 崔国发, 杨传东. 濒危植物梵净山冷杉野生种群结构及动态特征. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1479-1486.

[33] Svensson J S, Jeglum J K. Structure and dynamics of an undisturbed old-growth Norway spruce forest on the rising Bothnian coastline. Forest Ecology and Management, 2001, 151(1/3): 67-79.

[34] 王金山, 哈力克·玉米提, Cyffka B, 吾斯曼·库尔班, 彭树宏. 塔里木河下游胡杨林胸径结构及林木分布特征. 植物学报, 2008, 25(6): 728-733.

[35] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 张海娜, 李善家. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4272-4279.

[36] 李晓波, 王克, 范猛, 李宪高. 最小存活种群的确定与生物多样性保护. 东北师大学报: 自然科学版, 2001, 33(3): 86-90.

[37] 吴成贡, 蒋昌顺. 濒危植物保护生物学技术研究进展. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(3): 49-51.

[38] 国家林业局野生动植物保护与自然保护区管理司, 云南省林业厅, 中国科学院昆明植物研究所. 云南省极小种群野生植物保护实践与探索. 昆明: 云南科技出版社, 2013: 1-100.

[39] 许再富, 高江云, 李保贵, 周惠芳. 国家重点保护植物"迁地"与"近地"保护有效性的比较研究//中国植物园(第十五期). 西安: 中国植物学会, 2011: 6-15.

[40] 胡世俊. 生境片断化与隔离对濒危植物缙云卫矛(*Euonymus chloranthoides* Yang)种群特征的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007